



リアルタイム津波浸水予測手法の全国展開に向けた 実証研究

著者	井上 拓也
号	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5644号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127642

	いのうえ	たくや
氏	名	井 上 拓 也
授 与 学 位		博士 (工学)
学位授与年月日		平成31年3月27日
学位授与の根拠法規		学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称		東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目		リアルタイム津波浸水予測手法の全国展開に向けた実証研究
指 導 教 員		東北大学教授 越村 俊一
論 文 審 査 委 員	主査	東北大学教授 越村 俊一 東北大学教授 今村 文彦 東北大学准教授 マス エリック

論文内容要旨

近年, HPCI (High Performance Computing Infrastructure) の発展に伴い, 津波浸水想定で用いられるような高精度な数値解析を, 地震発生後 10 分以内といったリアルタイムで実行することが可能となった. 従来得られていた沿岸での予測津波高さだけでなく, 陸域において予測される浸水範囲や深さをリッチな面情報として取得できれば, 津波災害発生時の被害把握ならびに初動対応が劇的に効率化できると考えられる. しかし, 既往研究の即時解析対象範囲は海岸線延長 20—30 km 程度の市街地スケールに留まっている. 2011 年東北地方太平洋沖地震津波に見られるように, ひとたび巨大津波が発生すれば広域にわたる多数の沿岸自治体が同時に被災するため, 予測対象範囲を南海トラフ周辺の沿岸全域といった地域スケールに広げることが, リアルタイム津波浸水予測技術の実用化ならびに全国展開において, 解決しなければならない課題である.

以上を踏まえて, 本研究ではまず, 既存の津波浸水解析モデルと HPCI を用いて, 地域スケールの広域沿岸を対象とした 10 分以内の即時津波浸水解析が可能であるかを確認した. 津波解析モデルとして, 世界的に知られている東北大学の TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードを, HPCI としては東北大学のベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いた. その結果, 東北大学が運用する全 SX-ACE の 3 倍もの計算資源が必要と分かり, 実用化が難しいことが明らかになった. そこで, 解析領域及びネスティングの形状を従来の矩形から多角形に拡張することで, 高精度解析の対象地域を津波の遡上する沿岸域のみに限定した効率的な津波モデルを開発した. この多角形領域接続という新たな解析手法により, 広域津波解析において問題となる, 標高の高い地域に格子が配置されることや, 大水深の地域を含むことによりきわめて小さい時間積分間隔が要求されることが解決され, 同時に, 一連の沿岸が一つの解析領域に含まれることで, 解析領域が重複することによる無駄や領域端近傍での反射波による精度低下を回避することが可能となる (図 1).

新たに開発した津波モデルは、リアルタイムの津波予測を行うことで陸域の被害把握を支援することを目的とするものであるため、断層モデルからの初期水位変動分布の解析、津波伝播・浸水解析、最大浸水深分布とフラジリティカーブを用いた被害推定をワンストップで行えるように機能拡張を施した。また、津波伝播過程の予測だけでなく浸水の予測も行うものであるため、津波の浸水挙動に対して大きな影響を及ぼしうる潮位条件として、地震発生時刻を基にした対象地固有の天文潮位を設定できるようにした。さらなる性能向上が見込まれる HPCI の利用を念頭に、MPI 並列化を実施し、ベクトル演算と MPI 並列計算に関する最適化を施した。さらに、上述の改良を施した数値モデルの精度検証として、既存の矩形領域での解析結果との比較による Verification と、米国の National Tsunami Hazard Mitigation Program によって指定されたベンチマーク問題による Validation を行い、その妥当性を確認した。

津波解析の再現精度は、津波数値モデルの精度だけでなく、用いる初期波源モデルの精度にも大きく依存する。特にリアルタイム津波予測においては、短時間に信頼性の高い波源モデルを得ることが重大な課題となる。津波観測情報に基づく波源モデルは、直接的な観測に基づくために最も信頼性が高いと考えられるが、津波は地震波より伝播速度が遅いため取得には地震発生後一定の時間が必要である。そこで、本研究では、GNSS (Global Navigation Satellite System)、すなわち人工衛星による全地球測位システムを利用した地殻変動の連続観測データに基づく即時推定断層モデルに着目した。GNSS によるモデルは永久変位を基に断層推定を行うため、地震発生後 10 分以内という短時間で、地震規模だけでなく断層の広がりも含めて推定可能であるという特長を有している。この GNSS による即時推定断層モデルの、津波波源モデルとしての適用性を 2011 年東北地方太平洋沖地震の痕跡値との比較により検証した。GNSS による断層モデルは、陸域での観測に基づくために三陸沿岸で観測された非常に高い津波高の再現性には課題が残ると分かったが、太平洋沿岸の広域にわたる沿岸津波高を概ね再現できた。また、断層面上のすべり不均質等の複雑な情報も予測に取り込めることがリアルタイム津波解析の利点であるため、多数の断層要素から成るすべり分布モデルを矩形要素により近似的に表現することで、複雑な初期水位変動分布をリアルタイムで津波伝播・浸水解析の初期条件とする手法を構築・提案した。

本研究で開発した、広域の津波浸水評価においても効率的な即時津波解析モデルを、RTi (Real-time Tsunami inundation) モデルと呼ぶ。ケーススタディとして、海岸線延長 700 km の高知県全域を対象とした津波予報区規模の広域津波浸水解析を空間解像度 10m で実施し、RTi モデルが従来の 10 倍以上効率的であることを示した (図 2)。既存津波モデルでは東北大学が運用する全 SX-ACE リソースの 3 倍程度が必要であるため、10 倍以上の津波モデルの効率化により、全国即時津波浸水予測の実現可能性が示された。また、解析の精度と所要時間・リソースはトレードオフの関係にあるため、様々な利用ケースを考慮して 30 m, 90 m, 270 m という複数の空

間解像度でも南海トラフ全域を対象とした地域スケールの津波浸水解析に必要な計算機リソースを算定した。最後に、GNSS による即時推定断層モデルも含む本研究のケーススタディとして、内閣府の総合防災情報システムに採り入れられた津波浸水被害推計機能について概略を述べる。

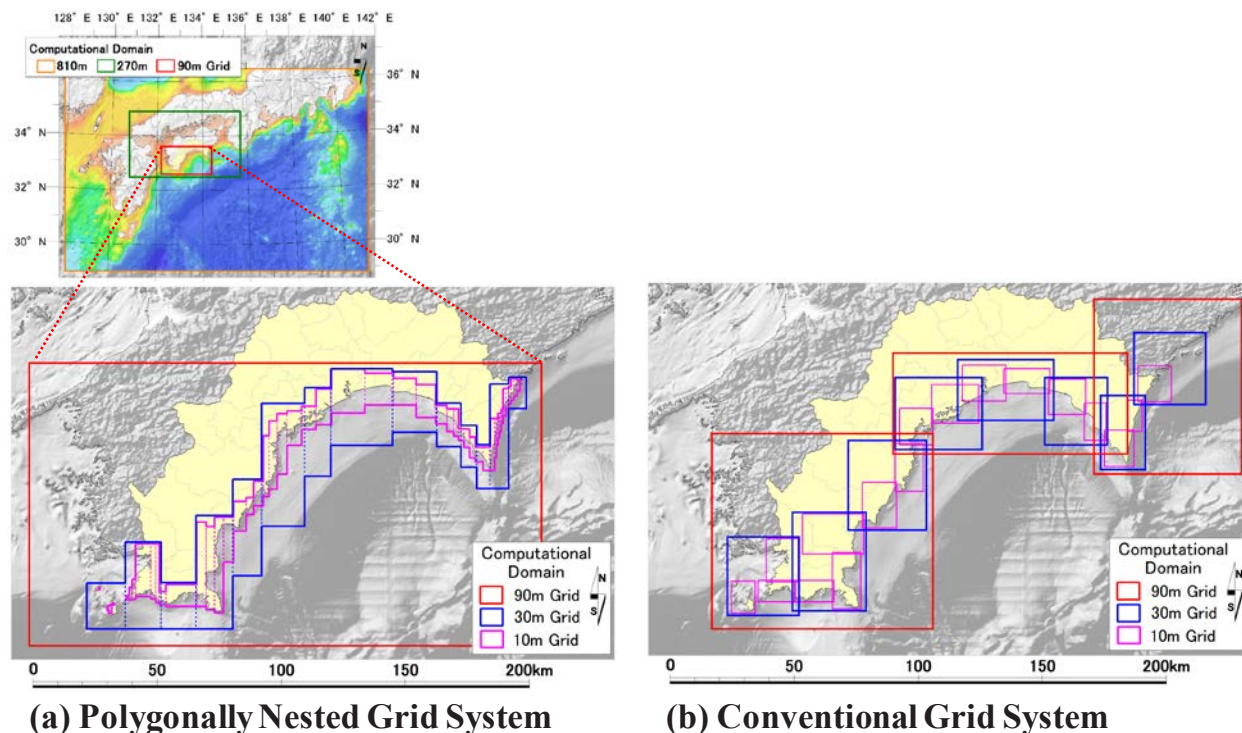


図1 津波予報区「高知県」を対象とした多角形領域の設定例。

多角形領域の設定例(a) と、従来手法の矩形領域を複数組み合わせて高知県全体を覆うイメージ(b)。

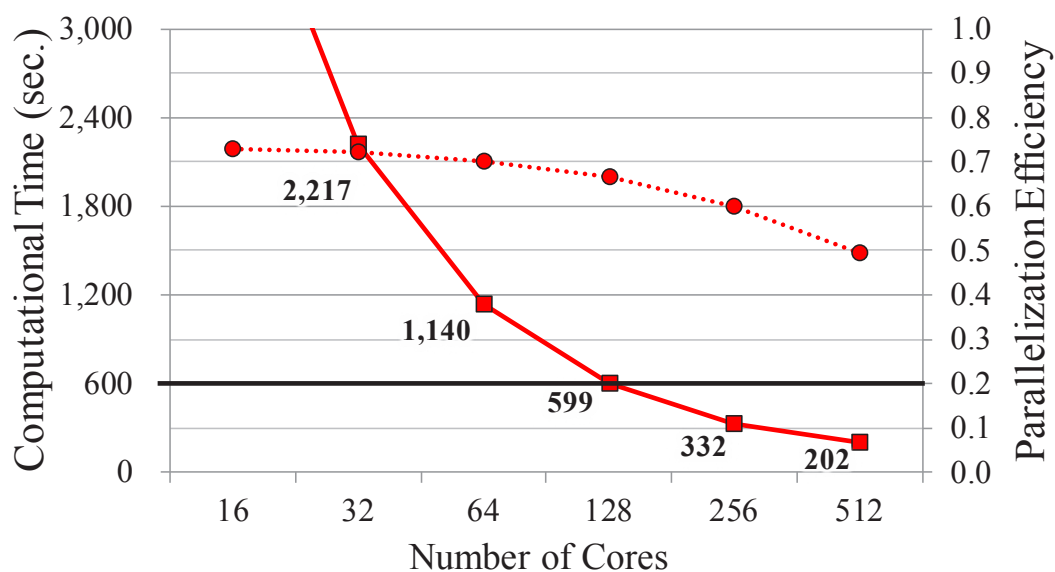


図2 津波予報区「高知県」を対象とした解像度 10 m の解析における所要時間と並列化効率。

解析所要時間（四角、左軸）を 10 分以内とするために必要なコア数は 128 だが、従来手法では 1,536 コア必要であった。

論文審査結果の要旨

近年、High-Performance Computing Infrastructure の発展に伴い、津波浸水の高精度数値解析をリアルタイムで実行することが可能となった。本研究では、リアルタイムで実施する津波浸水予測技術の全国展開および実用化・運用を目標として、予測手法の高度化・実証研究に取り組んだ。

本博士論文は全 7 章で構成されている。

第 1 章では、序論として研究の背景、目的および本研究の位置づけと構成について述べた。

第 2 章では、津波浸水予測計算のリアルタイム化に向けた要件を整理し、計算コードの並列化・ベクトル化による高速化の課題を整理し明らかにした。

第 3 章では、津波浸水のリアルタイム予測に向けた課題解決に取り組み、特に解析領域の形状を従来の矩形から多角形に拡張することで、解析領域の効率的設定を可能にする計算法を提案した。この多角形領域接続法という新たな計算手法により、計算領域設定の非効率性の排除や領域端近傍での精度低下を回避することが可能となったことは、重要な成果である。

第 4 章では、津波浸水予測の精度向上と妥当性検証に取り組んだ。3 章で提案した新しい領域接続法について、米国の研究グループによって提案されたベンチマーク問題による Verification & Validation を行い、その妥当性を確認できたことは、リアルタイム津波浸水予測の信頼性を担保する上で不可欠な成果である。

第 5 章では、GNSS による即時推定断層モデルの津波波源モデルとしての適用性について、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を例に検証した。GNSS による断層モデルでは、特に海溝軸近傍で発生した局所的かつ極めて高い津波の再現性には問題があるが、広域にわたる津波浸水域を概ね再現できることが分かった。リアルタイム浸水予測の第一報として利用すべき波源モデルの特徴を議論したことは重要な成果である。

第 6 章では南海トラフ全域を対象としたリアルタイム津波浸水予測の実証を行った。多角形領域接続法に基づくシミュレーション手法が従来法の 10 倍以上効率的に実施できることを示したことで、全国展開に向けた計算リソースの要件を明らかにしたことは重要な成果である。

第 7 章は結論である。

以上、リアルタイム津波浸水予測技術の全国展開と実用化に向けた課題を解決したことは、津波工学上の進展に大いに寄与できると評価された。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。